技術資料

作業環境向上のための溶接材料の発展*

小 林 実**

Development of Welding Materials to Improve Working Environment*

by Minoru Kobayashi**

1. ま え が き

アーク溶接過程では必然的にヒュームが発生し、溶接作業者はヒュームの発生源近くに位置することが必要なため、これをあてど吸入することは避けられず、近來労働衛生面から著しい注目を集めている。日本溶接協会では、1966年以来安全衛生委員会がこの問題を取り上げて測定法の規格化等を進めており、1974年には溶接棒部会技術委員会にヒュームに関する分科会が設置されて、発生源におけるヒュームに着目して各種共同研究を行なっている。海外各国の溶接関連学協会においても、安全衛生の問題の中でヒュームの問題は例外なく主要検討課題の一つであり、広い視野からの研究が進められている。それに伴って行政面からの関心も次第に深まり、各国それぞれ行政指導や法的規制の上で具体的に、かたきびしくなる方向にある。

このようなすう勢の中で、ヒュームに関心を持つ人々も各方面でますます増加しているが、これはこの分野にはまだまだ未解決の部分が多いことを如実に示すものであろう。事実、溶接アークからのヒュームの発生現象に関しても、生成したヒュームの物性に関しても、まだ研究すべき余地が多く、ヒュームの人体に対する影響についても医学的にまだ明確にされたとはいえないようである。溶接作業現場における対策については、それが生産性、経済性の向上と相反する要素を持つことが少なくないだけになおのこと研究の進展もおそく、対策の確立にも障害が多いといえよう。

溶接材料メーカーとしては、溶接作業環境を劣化させる源の生産販売を業としている以上、汚染物質に関して深く調査研究するとともに、汚染を少しでも軽減し得る製品を開発することは重要な義務と考えるべきであらう。その意味で、無害低水素系溶接棒や低ヒューム溶接棒が、世界に先がけてわが国で開発され実用化されて

いることは自負するに価しよう。これらの製品の開発にあたって、また今後の溶接材料の発展のためには、ヒュームの質及び量に関する基礎的な追求の資する所が大きいことは疑えない。

本稿では、作業環境向上のための溶接材料の発展を、その過程で得られたヒュームの本質に関する知見を中心に紹介し、今後の研究開発ならびに対策確立の一助となることを願うものである。

2. ヒュームの質に関する研究と改善

2.1 ヒュームの発生機構^{1,2)}

ヒュームを電子顕微鏡で観察すると、写真1のように0.1 μ 前後のきわめて微細な球状粒子の集合として見られる。写真のような粒子は、フラックスの破碎や、アークブローによる融液の飛散に起因するものとは考え難い。すなわちヒュームは、高温の蒸気が急冷凝縮して生じた固体微粒子と考えるべきである。元来 fume なる語の定義もその通りである。

写真1 溶接ヒュームの電子顕微鏡写真 (×20,000)

被覆アーク溶接棒による交流アークを高速度カメラで観察すると、撮影条件を適切に選択すれば写真2のように、各半サイクルごとに高温蒸気が吹き出し、吹き出した蒸気が凝縮してヒュームとなる様子が見られる。高温蒸気の吹き出しは溶滴移行の有無にかかわらず半サイク

*原稿受付 昭和53年12月1日

**正 員 (株)神戸製鋼所溶接棒事業部 Member, Welding Division, Kobe Steel, Ltd.

写真2 溶接アークからの高温ガスの吹き出し

図1 トレーサの蒸気圧とヒューム化率

ルごとに観察されるので、移行中の溶滴はヒュームにはあまり寄与していないと考えられる。

溶接棒の被覆剤、心線、及び母材それぞれのヒュームに対する寄与率を求めるため、各部分に一種のトレーサとして高温での蒸気圧が異なる3種の金属成分Mn, Cr, Niを既知量添加し、それらのヒューム化率を測定した結果は図1の通りである。まず重要なことは蒸気圧の高い成分ほどヒューム化率が高いことで、蒸発過

程がヒューム発生を支配していることが裏付けられる。ついで、被覆剤と心線からのヒューム化率は同等で、母材からのそれはかなり低い。すなわち、ヒュームの源となる高温蒸気は主として溶接棒先端から発生し、溶融池は比較的温度が低いためそこからの蒸発は少ないものと見られる。

以上の結果より、ヒュームは溶接棒先端の融液表面より発生した高温蒸気がアーク吹きと共に大気中に放出され、酸化を伴いつつ急速に冷却固化して生じる固体微粒

図2 ヒュームの発生機構

子であるということができる。これを図示すると図2のようになる。

Heile ら³⁾ もヒューム発生機構に対する考察を行っており、溶接棒先端と移行中の溶滴から発生する蒸気が支配的で、発生量については、それらの温度、アーク中の時間、および表面積との関連について論じている。

2.2 ヒュームの組成⁴⁾

ヒュームを多量に採取して化学分析すると、表1のような結果が得られる。表中F以外の成分は1種類の酸化物として示してある。たとえばFe(II)とFe(III)の合計をFe₂O₃に換算して表示した。

イルミナイト系、ライムチタニア系などの非低水素系溶接棒では、酸化鉄は被覆組成にかかわらず50%前後を占めるが、他の成分は、その成分が被覆中に多くなるとほぼ比例してヒューム中の含有量が増す。一方各成分の

表1 ヒュームの化学組成(%)

種別	JIS規格	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	F	NiO	Cr ₂ O ₃
イルミナイト系	D 4301	46.54	19.35	11.24	2.14	0.41	1.72	0.53	6.20	6.44	—	—	—
ライムチタニア系	D 4303	53.81	18.15	5.16	2.40	0.57	0.54	2.18	7.01	7.77	—	—	—
低水素系	D 5016	13.69	3.70	3.82	0.25	0.32	12.25	0.97	10.11	25.20	17.50	—	—
無害低水素系	D 5016	19.55	5.95	4.49	0.57	0.36	13.35	6.76	24.90	3.65	11.54	—	—
ステンレス用 ライムチタニア系	D308-16	6.89	6.67	9.04	8.57	0.98	4.23	0.12	2.87	22.14	17.66	0.59	7.26
C O ₂ 溶接 (ソリッドワイヤ)	YCW 1	75.47	10.69	12.57	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ヒューム化率はその蒸気圧と共に著しく増すので、蒸気圧の高い成分はヒューム中に多く、蒸気圧の低い成分はその逆になって、被覆組成とヒューム組成の間には大幅な開きを生じる。たとえば、 TiO_2 は蒸気圧が低いので被覆中に50%近く含有してもヒューム中では5%でいどにしかならない。

低水素系溶接棒の場合は、上記に比べ酸化鉄が著しく減少し、アルカリ成分が著しく増加していることが特徴的である。低水素ヒュームを吸入した時に特有の頭痛や発熱などの症状は、従来注目されていたふっ素の存在よりむしろこのような成分の特異性による所が大きいと考えられる。特に、アークの安定を保つためのカリウム含有量の多いことが重要であり、無害低水素系と称して非低水素系ヒュームと同等のものに改質した製品は、このカリウムを極力減少させることに成功したものである⁵⁾。低水素ヒュームにおける成分の特異性の原因はまだほとんど明らかにされていないが、ここにも今後の溶接材料発展の鍵がひそんでいるように思える。

ステンレス溶接ヒュームは、低水素系ヒュームと同様にカリウムの多いのが特徴であるが、その他に蒸気圧の高いクロムの含有量が高く、蒸気圧の低いニッケルの含有量は低い。最近ステンレスヒューム中のクロムに関する問題が提起されており、ヒュームの質に関する研究が進むに従ってその改善の方向も見出されるであろう。

ソリッドワイヤによる CO_2 溶接の場合、フラックスがないのでヒューム組成も単純である。マンガンがワイヤ中よりもヒュームに高いのは蒸気圧の高いことで説明がつくが、シリコンは蒸気圧が低く、ヒューム中に10

%も含有する理由は蒸気圧だけでは説明がつかない。Heile ら³⁾ はこの理由を、蒸気圧の高い SiO_2 分子の生成で説明できるとしている。

ヒュームの結晶組成はX線回折等の手段で知ることができる。一般にヒュームにおける結晶の母体は Fe_3O_4 であり、この中の Fe(II) および Fe(III) の一部は Mn などの他の金属原子と置換していると考えられる。非低水素系溶接棒や CO_2 溶接によるヒュームでは結晶としては Fe_3O_4 しか検出されず、残りの部分は SiO_2 などによる非晶質を形成しているのであろう。被覆中に SiO_2 が多くてもヒューム中では遊離けい酸は検出されない⁶⁾ ので、ヒュームは遊離けい酸を含まない粉じんとみなすことができる。 Fe_3O_4 はスピネル型結晶であるが、種々の例から見てヒューム形成過程ではスピネル型結晶が優先して析出することは興味ある事実である。低水素系ヒュームでは Fe_3O_4 のほかに NaF や CaF_2 が形成され、 KF は作らずに KCaF_3 となる。 Mg が多いときは MgF_2 はできずに MgO となる。

2.3 浮遊ヒュームの形状

ヒュームの1次粒子は写真1で見たように 0.1μ 前後の小さなものであるが、これが空気中に浮遊する時は多数の1次粒子が集合して大きな2次粒子を形成している。写真3は自然沈降した各種ヒュームの電子顕微鏡写真である。自然沈降なので生成直後より凝集が進んだものと見られるが、イルミナイト系に比べて低水素系はより小さくかつ密に凝集していることが特色である。低水素系ヒュームが密に凝集しやすいことの一因は吸湿性が高いことにあると考えられるが、写真に見られるていど

の小さい粒子は人体に吸入された時肺の深部まで到達しやすく、低水素ヒュームによる障害の一つの原因がここにあると考えられている⁷⁾。無害低水素系のヒュームが非低水素系同様の凝集をしていることは、形状面でも有害性が軽減されていることを示すものである。

CO_2 溶接ヒュームでは連鎖状の連なりはイルミナイト系より著しい。このような連なりには、ヒュームの結晶母体がスピネル型結晶であることが関与するものと考えられる。ヒュームの強い磁性はその結果でもあり、また原因でもあるだろう。

写真3 ヒュームの2次粒子 (×3,000)

3. ヒュームの量に関する研究と改善

3.1 ヒュームの許容濃度

溶接作業環境のヒュームの許容濃度について最初に提示されたのは1960年の IIW 勧告値で、低水素ヒュームの場合 10 mg/m^3 、非低水素ヒュームの場合 20 mg/m^3 以下であるべきとした。その後 ACGIH (米国労働衛生専門官会議) では、1974年に始めて溶接ヒュームとして種類の区別なしに 5 mg/m^3 の TLV を提示した。現段階ではこの値が世界的に採用される方向にある。わが国では1976年に WES 9004「溶接と溶断における環境管理」が定められ、ここで溶接ヒュームの許容濃度を 5 mg/m^3 とした。

作業環境のヒューム濃度を勧告値以下におさえるためには、局所排気や全体換気によって除去することが必要な場合も多いが、ヒュームの発生源でその量を減少させることもまた有効である。管理のために個々の発生源からの発生量を把握しておく必要もあろう。このような点でヒュームの量に関する研究が意義を持つようになる。

3.2 ヒューム発生量の測定方法

溶接アークから発生するヒュームの総量は、溶接法、溶接材料の種別、溶接条件などによって大幅に異なる。さらに測定法によっても結果が異なり、同一測定法でもわずかな条件差によるバラツキを生じやすい。したがって測定法の標準化が必要であり、JIS Z3930「被覆アーク溶接棒の全ヒューム量測定方法」が間もなく公布される。JIS によれば、図3のような捕集箱内で下向姿勢によるビードオンプレート溶接を行ない、ハイボリウムエアサンプラで発生ヒューム全量を捕集してその質量を測定する。測定単位としては単位時間当たりのヒューム量 (mg/min)、及び消費溶接棒の単位質量当たりのヒュー

図3 全ヒューム量測定装置

写真4 スエーデンのヒュームボックス

ム量 (mg/g) が示されている。この方法の主眼は発生ヒュームの全量を吸引捕集することであり、一部を捕集して計算で全量を求める方法は信頼性に問題のある場合が多い。

欧州ではスエーデンから提示された写真4のようなヒュームボックス⁷⁾が広く用いられており、米国ではAWSがJISと類似の測定方法を提案している⁸⁾。これらはいずれもヒューム全量を捕集する方法である。

3.3 溶接条件のヒューム発生量におよぼす影響^{9),10)}

同一溶接材料でも、溶接条件の変化がヒューム発生量に及ぼす影響は大きく、特に溶接電流とアーク電圧はアークに供給されるエネルギーを支配するので、その影響は顕著である。したがって、発生量の測定にあたってはこれらの条件を一定にすることが重要であり、また結果を提示するときには条件を明示しておかねばならない。

図4はイルミナイト系溶接棒において、各種棒径で電流を変化させた時のヒューム量の変化を示す。全棒径を総合して見れば、単位時間当たりの発生量は電流のほぼ2乗に比例し、棒の単位重量当たりの発生量は電流の平方根に比例して増加することが示されている。また図中で単一棒径内の2電流間の変化を見れば、電流によるヒュームの増加はさらに著しい。図5は各種被覆タイプの4mm径溶接棒で、電流を140, 170, 200Aの3段階に変化させた時のヒューム発生量を供給電力(電流X電

図4 溶接電流とヒューム発生量の関係

図6 アーク電圧とヒューム発生量の関係

図5 供給電力とヒューム発生量

図7 各種溶接棒のヒューム発生量

庄)で整理したもので、電力にほぼ比例してヒューム量の増加することが認められる。一般に溶接条件が変化した時のヒューム量は供給エネルギーに比例すると把握するのが簡明である。

図6は、4mm径のイリミナイト系溶接棒でアーク長を変化させて電圧を変えた時の測定結果である。この場合は電力の増加率よりもヒュームの増加率の方が大きく、空気との接触による酸化の促進、棒先端における極部的入熱増大による蒸発の促進などが考えられる。またこの結果は、すべての条件を同一にしても溶接者が変わればヒューム量の異なる事実が、主としてアーク長の変化に起因すると推察される根拠となる。

3.4 被覆剤組成のヒューム発生量におよぼす影響

被覆アーク溶接棒の場合、同一棒径同一電流であって

も被覆剤の組成によってヒューム発生量が著しく異なることは重要な事実である。図7は市販の4mm径溶接棒22種類を交流170Aで溶接した時のヒューム量を示したもので、200~400 mg/minの広い範囲にわたっている⁹⁾。被覆剤組成によってヒューム量が変わるということは、適切な被覆組成を選べば溶接棒としての性能を維持しながらヒューム量を減少させる可能性を示唆しており、低ヒューム溶接棒開発にあたってはこの考えが出发点であり、開発途上の信念でもあった。

被覆剤組成の影響を調べるのにまず考えられることは個々の原料の効果である。図8は、1種の原料のみで被覆した4mm径溶接棒を製作してヒューム量を測定した例である¹¹⁾。原料によって100~800 mg/minという広い範囲に変化し、アーク電圧を高める原料はヒューム量を増す傾向が認められる。しかしこれらの原料を組み合わせると種々の交互作用が現われ、市販溶接棒のように複雑な組成にそのまま適用するわけには行かない。

図8 原料溶剤によるヒューム発生傾向

図9 実験溶接棒のヒューム発生量の期待値

組み合わせの実験例として、低水素系溶接棒の基本組成に対する珪石とルチルの添加量及び水ガラスの種類がヒューム量に及ぼす影響を調査した結果を図9に示す¹²⁾。珪石の増量はヒュームを増加させ、ルチルの増加はヒュームを減少させる。水ガラスはカリウム含有量の多いものを使用するほどヒュームは増す。別に森田ら¹³⁾は、61種類の市販溶接棒の被覆、スラグ、ヒュームを分析し、ヒューム発生量との関係を統計的に解析した結果、アルカリの減少は一般にヒュームを減少させ、非低水素系では有機物と炭酸塩の減少及びチタンとカルシウムの増加がヒューム量減少に寄与するという結論を得ている。

最近話題を呼んでいる低ヒューム溶接棒は、このよう

な多くの実験、研究の結果を利用し、膨大な試行錯誤の結果開発されたものであり、各種被覆タイプのものが実用化されている。それぞれ溶接作業性、機械的性質等は従来の同タイプ製品として要求される性能を維持しながら、ヒューム量を30～50%減少させることに成功している。ある場合には、数多い試作の成果として従来の製品より性能が向上している例もある。

被覆組成によるヒューム量の変化機構についてはまだ明らかにされてはいないが、空气中に放出される高温蒸気の量がヒューム量と重要な関係を持つことは間違いのない。蒸気の発生量は融液表面の温度、蒸気圧、表面積等の関数であり、たとえばアーク温度との関連性などについて研究が進められている。

4. あとがき

複雑な組成、構造を持つ溶接ヒュームの本質はまだ究明されるべき余地が多く、各方面での研究が進みつつある。本稿で述べたようなヒュームの質及び量に関する知見は、溶接材料の開発のみならず、発生後のヒュームを除去し、あるいは作業者がヒュームを吸入しないための方策に対しても有効であろう。ともあれ、今後さらにヒュームの質を改善し、量を低減し、あるいは溶接法、溶接装置、ヒューム除去装置、呼吸保護具の発展まで含めて作業環境の改善に資することは、溶接材料の研究者に引き続き与えられた課題であり、各方面での地道な研究成果が次第に反映され、発展して行くであろう。

参考文献

- 1) 小林他：“高速度カメラによるヒューム発生状況の観察”，本誌講演概要集
- 2) 小林他：“溶接ヒュームの発生機構に関する一考察”，第66回溶接冶金研究委員会資料(1976)。
- 3) Heile 他：“Particulate Fume Generation in Arc Welding Processes”，Weld. J. Vol. 54 (1975), 201s
- 4) 小林他：“被覆アーク溶接のヒューム組成について”，本誌講演概要集。
- 5) 河田他：“低水素溶接作業時に発生する有害物とその安全衛生に関する実験的研究”，鉄鋼労働衛生, Vol. 12, No. 2 (1963), 61
- 6) Backup 他：“Silicic Acid in Welding Smokes”，IIW Doc. VIII-707-77 (1977)
- 7) “Swedish Standard for Classification of Manual Metal Arc Welding Electrodes into Fume Classes”，IIW. Doc. VIII-629-75 (1975)
- 8) AWS：“The Welding Environment”，(1973)
- 9) 小林他：“ヒューム発生量に影響を及ぼす諸要因について”，本誌講演概要集, No. 18 (1976), 361
- 10) 小林他：“Factors Affecting the Amount of Fumes Generated by Manual Metal Arc Welding”，IIW Doc. II-783-76, VIII-670-76 (1976)
- 11) 五代他：“低ヒューム被覆アーク溶接棒”，神戸製鋼技報, Vol. 26, No. 4 (1976), 44
- 12) 小林他：“Development of Fume Controlled Electrodes”，IIW Doc. II-865-78, VIII-775-78 (1978)
- 13) 森田他：“Investigation on Welding Fumes From Covered Electrode and Development of Low Fume Electrodes”，IIW Doc. II-818-77, VIII-724-77 (1977)